

# 論文 CFRP ロッドを用いたコンクリート構造物の耐疲労性に関する実験研究

野口 博之\*1・水口 和彦\*2・阿部 忠\*3

**要旨**：コンクリート構造物は経年劣化による損傷や疲労損傷に加え、凍害や塩害による鉄筋の腐食が生じ、耐疲労性が低下している。本研究は鉄筋の代替材として高強度でかつ軽量、耐蝕性に優れた CFRP ロッドを用いたコンクリート部材を提案し、移動荷重試験を実施して従来の鉄筋を配置したコンクリート部材と比較して CFRP ロッドを用いたコンクリート部材の耐疲労性を検証した。その結果、CFRP ロッドを用いたコンクリート部材は従来の鉄筋を配置したコンクリート部材と同等の等価走行回数を得られたことから十分な耐疲労性を有しており、CFRP ロッドはコンクリート構造物における鉄筋の代替材として有用である。

**キーワード**：コンクリート部材, CFRP ロッド, 移動荷重試験, 耐疲労性

## 1. はじめに

現在供用されているコンクリート構造物の多くは建設後 50 年が経過しており、疲労損傷や建設地域の環境状況による劣化損傷が生じている<sup>1)</sup>。とくに、海岸線部や積雪寒冷地域のコンクリート構造物では疲労損傷に加えて飛来塩分ならびに融雪剤の散布により塩化物イオンがコンクリート構造物内部に浸透し、鉄筋の不動態被膜が破壊され鉄筋の腐食・断面欠損が多数報告されている<sup>2)</sup>。鉄筋の腐食および断面欠損が生じたコンクリート構造物は耐荷力性能および耐疲労性の低下が懸念されており、これらの損傷を受けたコンクリート構造物の維持管理が重要な課題として挙げられている<sup>2)</sup>。

このように海岸線部や積雪寒冷地域における塩害対策として耐蝕性や電磁遮断特性に優れた繊維系材料を用いた補修・補強法が開発されている。その中でも高強度、高耐久性を有する繊維系材料として炭素繊維シート (Carbon Fiber Sheet : 以下, CFS) や炭素繊維補強樹脂 (Carbon Fiber Reinforced Polymer : 以下, CFRP) 格子筋を用いた補修・補強法<sup>3)6)</sup>が提案され、各種実験から炭素繊維系材料を用いた補修・補強法の有用性が評価されている。その研究成果は、道路橋床版などの土木構造物の補修・補強法として実施工に数多く適用されている。一方、鉄筋の代替材として繊維系材料をコンクリート部材に適用させた研究<sup>7)8)</sup>も行われ、静的荷重載荷によるはり部材や床部材の検討が行われている。しかし、移動荷重や走行荷重による実験検討はほとんど行われていないのが現状である。

そこで本研究では、コンクリート構造物の補強材として適用されている高強度でかつ耐蝕性に優れた炭素繊維系材料 CFRP ロッドを鉄筋の代替材として使用したコン

クリート部材を提案した。実験では、輪荷重走行疲労装置を用いて移動荷重載荷実験を実施し、提案するコンクリート部材の耐疲労性を検証した。

## 2. 塩害作用を受けたコンクリート構造物

積雪寒冷地域や海岸線部に建設されたコンクリート構造物は、ひび割れなどの疲労損傷に加えて飛来塩分ならびに融雪剤散布による塩害によって鉄筋の腐食および断面欠損が多数報告されている。ここで、供用開始後 47 年で撤去された道路橋 RC 床版の鉄筋の損傷状況を写真-1 に示す<sup>9)</sup>。撤去された道路橋 RC 床版は河口部から 2km ほど離れた位置に建設されており、複数回の補修補強が施されている。撤去時に実施された EPMA 試験によるコンクリートの塩化物イオン量の調査では 2007 年改定のコンクリート標準示方書<sup>10)</sup>に規定される鋼材腐食発錆限界濃度 1.2kg/m<sup>3</sup>を上回っており、コンクリート内に塩分が内在していることから写真-1 に示すように撤去された床版部材の鉄筋は発錆が見られ、一部断面欠損が生じている。

以上より、海岸線部や積雪寒冷地域における塩害作用



写真-1 撤去された RC 床版の鉄筋の腐食状況

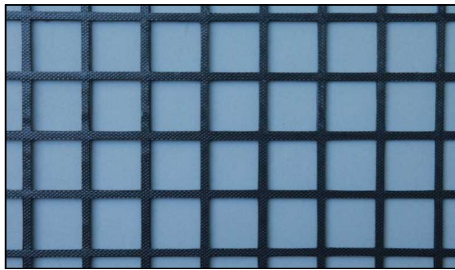
\*1 日本大学 生産工学部土木工学科助手 博士(工学) (正会員)

\*2 日本大学 生産工学部土木工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 日本大学 名誉教授 博士(工学) (正会員)



(1) CFS



(2) CFRP 格子筋



(3) CFRP ロッド

写真-2 炭素繊維系材料

を受けたコンクリート構造物は内部に浸透した塩化物イオンによって鉄筋の腐食および発錆が生じ、コンクリート構造物の耐久性の低下が懸念される。

### 3. 炭素繊維系材料

橋梁などのコンクリート構造物の補修補強法に適用されている炭素繊維系材料は従来の補強筋として使用されている鉄筋と比較して10倍以上の強度特性、比重が1/5と軽量である。そのため、1994年改定の道路橋示方書・同解説<sup>1)</sup>(以下、道示)以前で設計された床版厚および鉄筋量が不足しているRC床版の引張補強材として適用され、補強されたRC床版は耐疲労性が大幅に向上している。ここで、引張補強材として適用されている炭素繊維系材料の一例を写真-2に示す。

コンクリート構造物の補修補強に適用されている炭素繊維にはPAN系炭素繊維とピッチ系炭素繊維に分類される。PAN系炭素繊維はピッチ系炭素繊維と比較して高

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				SP (C×%)
		C	W	S	G	
52.5	48.1	324	170	847	956	3.40

W/C：水セメント比，s/a：細骨材率

C：セメント，W：水，S：細骨材，

G：粗骨材，S.P：高性能AE減水材

表-2 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋(SD295A D13)		
		降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
RC	33.2	368	513	200
CFRP	30.4	—	—	—

強度を有することから橋脚や耐震補強に適用される。一方、ピッチ系炭素繊維は低弾性から高弾性までの広範囲の特性を有しており、RC床版や鋼部材など剛性の向上を求める構造物の補強材として適用されている。本研究においては鉄筋の代替材としてコンクリート構造物への適用を検討することからコンクリート構造物の剛性を確保するためにピッチ系のCFRPロッドを適用する。

## 4. 供試体概要

### 4.1 使用材料

#### (1) コンクリート部材

本実験に用いる鉄筋を用いたコンクリート部材およびCFRPロッドを用いたコンクリート部材のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと最大骨材寸法20mmの砕石、最大骨材寸法5mmの砕砂を用いた。また、鉄筋にはSD295A、D13を用いた。ここで、コンクリートの示方配合を表-1、コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-2に示す。

#### (2) CFRP ロッド

海岸線部に建設されたコンクリート構造物は経年劣化や移動荷重による疲労損傷に加え、飛来塩分による鉄筋の腐食や塩害が多数報告されている<sup>1)</sup>。また、積雪寒冷地域では融雪剤の散布による塩害や凍害の複合劣化が生じて床上面の土砂化や鉄筋の腐食により断面欠損が生じて耐久性が低下している<sup>1)</sup>。これらの損傷に対して炭素繊維系材料を用いた補修補強法が提案され、その有用性が評価されている<sup>4)7)</sup>。しかし、新設コンクリート構造物への適用事例や検討例が少ないのが現状である。

そこで本実験では鉄筋の代替材としてCFRPロッドを用いる。CFRPロッドは高弾性率のピッチ系炭素繊維とエポキシ系熱硬化樹脂を複合化した芯材の表層に樹脂を含んだ炭素繊維を螺旋状に巻き付けて硬化形成させた。

表-3 CFRP ロッドの材料特性

公称径 (mm)	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	破壊耐力 (kN)	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	単位重量 (g/m <sup>3</sup> )
12.5	122.7	176	125	248

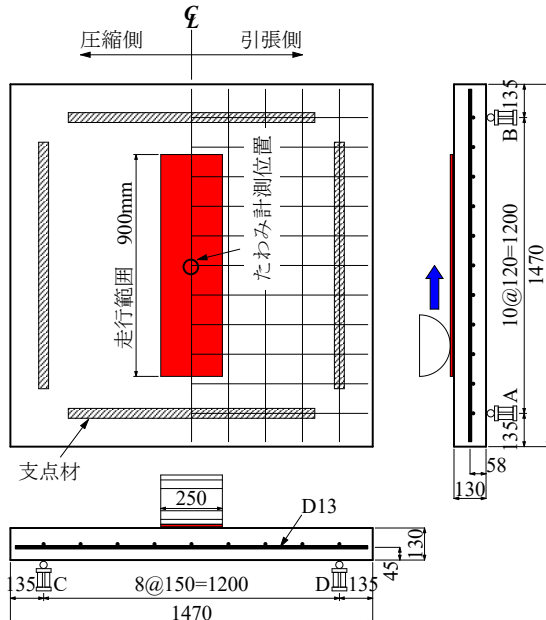


図-1 供試体寸法

CFRP ロッドの直径は異形鉄筋 D13 とほぼ同様のφ12.5mmに成型する。ここで、CFRP ロッドの材料特性値を表-3に示し、形状を写真-2に併記する。

#### 4.2 供試体寸法

RC 部材および CFRP ロッドを用いたコンクリート部材の供試体寸法を図-1に示す。

##### (1) RC 部材

RC 部材の寸法は、全長 1,470mm、支間 1,200mm、供試体厚 130mm とした。鉄筋配置は単鉄筋配置とし、引張側には D13 を橋軸直角方向に 120mm 間隔、橋軸方向に 150mm 間隔で配置し、主鉄筋の有効高さは 85mm、配力鉄筋の有効高さは 72mm とした。ここで、供試体名称を RC-1 とする。

##### (2) CFRP ロッドを用いたコンクリート部材

CFRP ロッドを用いたコンクリート部材の寸法は、RC 部材と同様とした。CFRP ロッドの配置は、RC 部材と同様に引張側には D13 相当の CFRP ロッドを橋軸直角方向に 120mm 間隔、橋軸方向に 150mm 間隔で配置した。主鉄筋および配力鉄筋の有効高さはそれぞれ 85.5mm、73mm である。ここで、供試体名称を CFRP-1, 2 とする。

### 5. 実験方法および等価走行回数

#### 5.1 輪荷重走行疲労装置

本実験では移動荷重による CFRP ロッドを用いたコン



写真-3 輪荷重走行装置

クリート部材の耐疲労性に関する評価を行いことから輪荷重走行疲労装置を用いて実験を行った。ここで、輪荷重走行疲労装置を写真-3に示す。本実験に用いた輪荷重走行疲労装置は、鋼製反力フレーム (400kN) のほりに鋼製の車輪 (直径 400mm、幅 300mm) を取り付けた油圧式の輪荷重走行疲労試験機を固定し、供試体を設置した台車をモータとクランクアームにより水平方向へ往復運動させて車輪の走行状態を実現するものである。

#### 5.2 輪荷重走行疲労実験

輪荷重走行疲労実験は従来の鉄筋を用いたコンクリート部材および CFRP ロッドを用いたコンクリート部材ともに供試体の支間中央から±450mm の範囲を繰り返し走行させ、破壊または走行不能に至るまで繰り返し走行させる実験である。RC 部材および CFRP ロッドを用いたコンクリート部材ともに初期荷重を 50kN で静的載荷実験を行い、20,000 回走行させる。その後、荷重を増加して 60kN で 20,000 回させ、以降は 20,000 回走行ごとに荷重を 20kN ずつ増加させる段階荷重載荷とする。たわみの計測には実験走行回数 1 回、10 回、100 回、1,000 回、5,000 回および以降は 5,000 回ごとに計測を行った。たわみは支間中央のたわみとする。

#### 5.3 等価走行回数

CFRP ロッドを用いたコンクリート部材の耐疲労性の評価において本実験は 20,000 回走行ごとに荷重を増加させる段階荷重載荷とすることから等価走行回数を算出して耐疲労性を評価する。等価走行回数は、マイナー則に従うと仮定すると式(1)として与えられる。なお、式(1)における基準荷重 P は本供試体の輪荷重幅が 250mm と道示に規定する車輪幅 500mm のモデル化 (1/2 モデル) であることから道示に規定する B 活荷重の 1/2 (=50kN) に安全率 1.2 を考慮した 60kN とする。また、式(1)に適用する S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 m には、松井ら<sup>12)</sup>が提案する S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 m=12.7 を適用する。



表-4 等価走行回数

供試体		荷重				等価走行回数 合計	走行回数比
		50 kN	60 kN	80 kN	100 kN		
RC-1	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	2,690	2,561,192	-
	等価走行回数	1,974	20,000	772,239	1,766,979		
CFRP-1	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	2,542	2,463,975	0.96
	等価走行回数	1,974	20,000	772,239	1,669,762		
CFRP-2	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	3,844	3,319,219	1.30
	等価走行回数	1,974	20,000	772,239	2,525,006		

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^m \times n_i \quad (1)$$

ここで、 $N_{eq}$ ：等価走行回数（回）、 $P_i$ ：載荷荷重（kN）、 $P$ ：基準荷重（=60kN）、 $m$ ：S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値（=12.7）、 $n_i$ ：実験走行回数（回）

## 6. 実験結果および考察

### 6.1 等価走行回数

本実験における RC 部材および CFRP ロッドを用いたコンクリート部材の実験走行回数と式(1)より算出した等価走行回数を表-4 に示す。

#### (1) RC 部材

供試体 RC-1 の等価走行回数は  $2.561 \times 10^6$  回である。供試体 RC-1 の等価走行回数を基準として CFRP ロッドを用いたコンクリート部材の耐疲労性の検証を行う。

#### (2) CFRP ロッドを用いたコンクリート部材

CFRP ロッドを用いた供試体 CFRP-1、CFRP-2 の等価走行回数はそれぞれ  $2.463 \times 10^6$  回、 $3.319 \times 10^6$  回となり、平均等価走行回数は  $2.891 \times 10^6$  回である。基準である供試体 RC-1 と比較して 1.13 倍の等価走行回数とほぼ同等の等価走行回数が得られている。

以上より、CFRP ロッドを用いたコンクリート部材は従来の鉄筋を配置した RC 部材と同等の等価走行回数を有していることから耐疲労性が評価できる。よって、鉄筋の代替材として CFRP ロッドを配置したコンクリート部材は有用性があるものと判断できる。

### 6.2 たわみと等価走行回数の関係

輪荷重走行疲労実験におけるたわみと等価走行回数の関係を図-2 に示す。

#### (1) RC 部材

供試体 RC-1 の初期荷重 50kN 載荷時の初期たわみは 1.36mm であり、輪荷重の繰り返し走行と荷重の増加に伴いたわみが緩やかに増加している。その後、たわみが

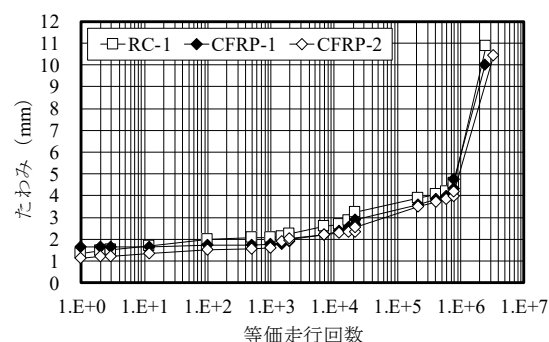


図-2 たわみと等価走行回数の関係

4mm を超えた付近からたわみの増加傾向が大きくなり、破壊に至っている。破壊時のたわみは 10.89mm である。

#### (2) CFRP ロッドを用いたコンクリート部材

供試体 CFRP-1 の初期荷重 50kN 載荷時の初期たわみは 1.64mm である。たわみの増加傾向は供試体 RC-1 と同様に輪荷重の繰り返し走行と荷重の増加に伴いたわみが緩やかに増加している。その後、たわみが 4mm を超えた付近からたわみの増加傾向が大きくなり破壊に至った。破壊時のたわみは 10.00mm である。

次に、供試体 CFRP-2 の初期荷重 50kN 載荷時の初期たわみは 1.15mm であり、供試体 CFRP-1 と初期載荷時のたわみが異なるものの供試体 CFRP-1 と同様に輪荷重の繰り返し走行と荷重の増加に伴いたわみが緩やかに増加している。その後、たわみが 4mm を超えた付近からたわみの増加傾向が大きくなり、破壊に至った。破壊時のたわみは 10.43mm である。

以上より、CFRP ロッドを用いたコンクリート部材は従来の鉄筋を配置したコンクリート部材と同様なたわみの増加傾向を示し、たわみが 4mm に達した付近からたわみが増大する傾向にある。

### 6.3 ひずみと等価走行回数の関係

輪荷重走行疲労実験におけるひずみと等価走行回数の関係を図-3 に示す。

#### (1) RC 部材

供試体 RC-1 の初期荷重 50kN 載荷時の初期ひずみは

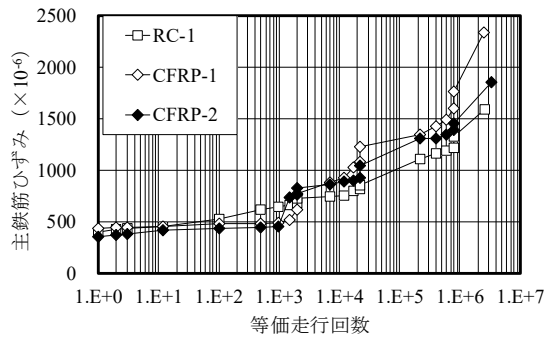


図-3 ひずみと等価走行回数の関係

$394 \times 10^{-6}$  であり、輪荷重の繰り返し走行と荷重の増加に伴いひずみは緩やかに増加している。その後、たわみが  $4\text{mm}$  を超えた付近の等価走行回数からひずみの増加傾向が大きくなり、破壊に至っている。破壊時のひずみは  $1592 \times 10^{-6}$  である。

(2) CFRP ロッドを用いたコンクリート部材

供試体 CFRP-1 の初期荷重  $50\text{kN}$  載荷時の初期ひずみは  $431 \times 10^{-6}$  であり、供試体 RC-1 と同様に輪荷重の繰り返し走行と荷重の増加に伴いひずみは緩やかに増加している。その後、たわみが  $4\text{mm}$  を超えた付近の等価走行回数からひずみの増加傾向が大きくなり、破壊に至っている。破壊時のひずみは  $2334 \times 10^{-6}$  である。

次に、供試体 CFRP-2 の初期荷重  $50\text{kN}$  載荷時の初期ひずみは  $354 \times 10^{-6}$  であり、各供試体と同様に輪荷重の繰り返し走行と荷重の増加に伴いひずみは緩やかに増加している。その後、たわみが  $4\text{mm}$  を超えた付近の等価走行回数からひずみの増加傾向が大きくなり、破壊に至っている。破壊時のひずみは  $1855 \times 10^{-6}$  である。

以上より、CFRP ロッドを用いたコンクリート部材はたわみの増加傾向と同様に従来の鉄筋を配置したコンクリート部材と同様なひずみの増加傾向を示した。また、CFRP ロッドの破断は見られず本実験の範囲内において

は弾性変形を保持して破壊に至った。

6.4 破壊状況

輪荷重走行疲労実験終了後のコンクリート部材の下面の破壊状況を図-4 に示す。

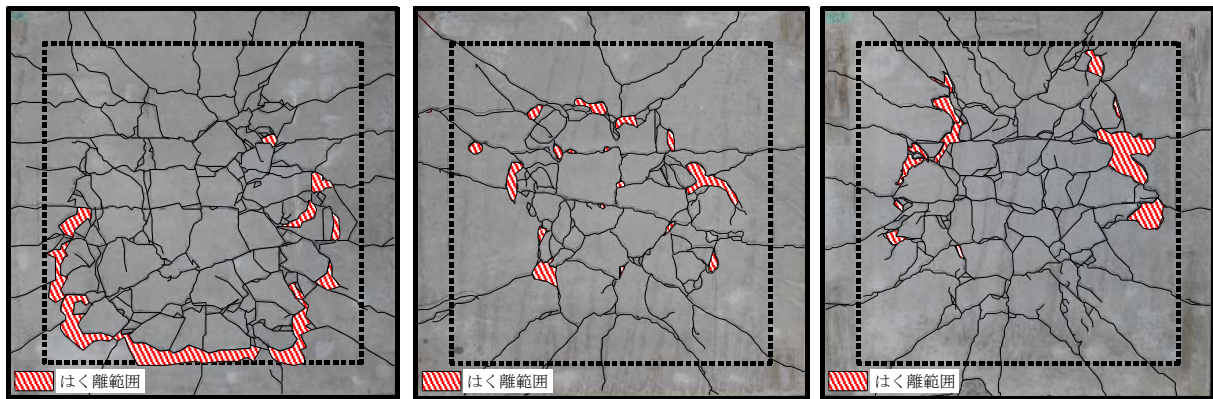
(1) RC 部材

供試体 RC-1 のコンクリート部材の下面の損傷状況は図-4(1)に示すように、鉄筋が配置された橋軸直角方向および橋軸方向に沿って2方向ひび割れが発生し、格子状を形成している。また、輪荷重走行位置から  $45$  度底面にダウエル効果の影響によるはく離が広範囲にわたって発生している。破壊は輪荷重が走行中の押抜きせん断破壊に至った。

(2) CFRP ロッドを用いたコンクリート部材

供試体 CFRP-1 のコンクリート部材の下面の損傷状況は図-4(2)に示すように、供試体 RC-1 と同様に CFRP ロッドが配置された橋軸直角方向および橋軸方向に沿って2方向ひび割れが発生し、格子状を形成している。輪荷重走行位置から  $45$  度底面にダウエル効果の影響によるはく離が見られるものの供試体 RC-1 と比較してはく離範囲が狭い。これは CFRP ロッドと鉄筋の突起形状の差異によるもので CFRP ロッドとコンクリートの付着性能は異形鉄筋とコンクリートの付着性能と比較して低く、移動荷重が作用した際に、CFRP ロッドとコンクリートですべりが生じやすいためと推察される。また、CFRP ロッドの材料特性から引張強度が高く終局時まで弾性変形を保持するが、ヤング係数が鉄筋の  $62.5\%$  であるため鉄筋を用いた供試体より曲げ剛性が小さく、せん断抵抗力が鉄筋を適用したコンクリート部材と比較して小さいためと推察される。破壊は走行中に床支間中央で押抜きせん断に至った。

次に、供試体 CFRP-2 のコンクリート部材の下面の損傷状況は図-4(3)に示すように、供試体 CFRP-1 と同様に橋軸直角方向および橋軸方向に沿って2方向ひび割れ



(1) RC-1

(2) CFRP-1

(3) CFRP-2

図-4 破壊状況

が発生し、格子状を形成している。輪荷重走行位置から45度底面にダウエル効果の影響によるはく離が見られるものの供試体 RC-1 と比較してはく離範囲が狭い。これは供試体 CFRP-1 と同様に CFRP ロッドとコンクリートの付着性能が低く、すべりが生じやすいためである。また、ヤング係数が鉄筋と比較して低いためせん断抵抗力が RC 構造と比較して小さいためと推察される。破壊は走行中に支間中央付近で押抜きせん断に至った。

以上より、CFRP ロッドを配置したコンクリート部材は従来の鉄筋を配置したコンクリート部材と同様に床下面に2方向ひび割れを形成し、押抜きせん断破壊に至っている。しかし、はく離範囲においては差異が見られた。これは、補強筋の形状に差異があり、コンクリートとCFRP ロッドとの付着性能が RC 構造と比較して小さいためと推察される。また、CFRP ロッドのヤング係数が鉄筋より低いため剛性が低下し、せん断抵抗力が RC 構造より小さいためと推察される。

## 7. まとめ

- (1) 等価走行回数より、CFRP ロッドを用いたコンクリート部材は従来の鉄筋を配置したコンクリート部材と比較して同等の等価走行回数が得られていることから CFRP ロッドを用いたコンクリート部材の耐疲労性が評価できる。また、同等の耐疲労性を有していることから海岸線部や融雪剤を散布による塩害作用を受けたコンクリート部材、電磁遮断を必要とするコンクリート構造物などの新設構造物における鉄筋の代替材として有用性があると考えられる。
- (2) たわみと等価走行回数の関係より、CFRP ロッドを用いたコンクリート部材は従来の鉄筋を用いたコンクリート部材と同様に輪荷重の繰り返し走行によりたわみが4mmまでは緩やかに増加している。その後、たわみが4mmを超えた付近から急激に増加し、破壊に至っている。
- (3) ひずみと等価走行回数の関係より、CFRP ロッドを用いたコンクリート部材は従来の鉄筋を用いたコンクリート部材と同様のひずみの増加傾向となった。また、本実験の範囲内においてはCFRP ロッドの破断は確認されなかった。
- (4) 破壊状況より、従来の鉄筋を用いたコンクリート部材と同様に供試体下面には2方向ひび割れが形成された。また、破壊は全ての供試体で押抜きせん断破壊に至っている。しかし、補強筋の形状の差異か

らコンクリートと CFRP ロッドとの付着性能が鉄筋を適用した場合と比較して低く、ヤング係数が鉄筋と比較して低いため剛性およびせん断抵抗力が小さくなることから従来の RC 構造よりもはく離範囲が狭くなる結果となった。

## 参考文献

- 1) (公社)土木学会：鋼構造物シリーズ 26 道路橋床版の維持管理マニュアル 2016, 2016.11
- 2) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領, 2019.2
- 3) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 小森篤也, 児玉孝喜：輪荷重走行疲労実験における RC 床版上面増厚補強法の耐疲労性の評価法, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1270-1281, 2010.3
- 4) 高木智子, 阿部忠：CFRP ロッドを用いたはり部材の耐疲労性の評価, 日本材料学会, 第 58 回日本学術会議材料工学連合講演会, pp.81-82, 2014.10
- 5) 小森篤也, 阿部忠, 小林朗：CFRP 格子筋と PCM を用いる床版下面増厚補強法における接着剤の付着メカニズムおよび耐疲労性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1567-1572, 2015.7
- 6) 永井幸太, 阿部忠, 小森篤也, 小林朗：中・高弾性型 CFS 接着補強におけるポリウレア樹脂を用いた RC 床版の耐疲労性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1135-1140, 2017.7
- 7) 村上聖, 村上由祐, 武田浩二, 久部修弘：CFRP ロッドを主筋に用いた RC 梁の終局曲げ強度に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, pp.517-pp.524, 2018.3
- 8) 大西弘志, 盛合将和, 天野順弘, 松原澄行：AFRP ロッドを適用した床版と RC 床版の押し抜きせん断試験による耐力の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.1489-1494, 2019.7
- 9) 高野真希子, 阿部忠, 木田哲量, 小森篤也, 児玉孝喜, 小川洋二：47 年供用した RC 床版の CFSS 下面補強および SFRC 上面増厚補強における耐疲労性の評価, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1286-1296, 2011.3
- 10) (公社)土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2008.3
- 11) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, 2002.3
- 12) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.10